

ЭПТ 2015



ACED 2015

УДК 621.313-57

## 6.6. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА ПРИ ПУСКЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

### EVALUATION CRITERIA OSCILLATORY COMPONENT OF THE ELECTROMAGNETIC TORQUE AT START-UP OF HIGH-VOLTAGE INDUCTION MOTORS

**Вечеркин Максим Викторович**, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия, 455000, г. Магнитогорск, ул. Ленина, 38. E-mail: [vecherkin@inbox.ru](mailto:vecherkin@inbox.ru). Тел.: +79642455681.

**Сарваров Анвар Сабулханович**, д-р. техн. наук, профессор кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия, 455000, г. Магнитогорск, ул. Ленина, 38. E-mail: [anvar@magtu.ru](mailto:anvar@magtu.ru). Тел.: 8 (3519) 22-45-87.

**Петрякова Екатерина Сергеевна**, студент кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия, 455000, г. Магнитогорск, ул. Ленина, 38. E-mail: [petryakova-ekaterina@mail.ru](mailto:petryakova-ekaterina@mail.ru).

**Макаров Александр Валерьевич** – аспирант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия, 455000, г. Магнитогорск, ул. Ленина, 48. E-mail: [makarov@mgn.ru](mailto:makarov@mgn.ru).

**Макарчева Евгения Валентиновна** – магистрант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия, 455000, г. Магнитогорск, ул. Ленина, 38. E-mail: [cojens@mail.ru](mailto:cojens@mail.ru).

**Maksim V. Vecherkin**, Cand. Sc., Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, 455000, Lenin street, 38, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [vecherkin@inbox.ru](mailto:vecherkin@inbox.ru). Ph.: +79642455681

**Anvar S. Sarvarov**, Doctor Sc., Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, 455000, Lenin street, 38, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [anvar@magtu.ru](mailto:anvar@magtu.ru). Тел.: 8 (3519) 22-45-87.

**Ekaterina S. Petryakova**, Student, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, 455000, Lenin street, 38, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [petryakova-ekaterina@mail.ru](mailto:petryakova-ekaterina@mail.ru).

**Aleksandr V. Makarov**, Graduate Student, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, 455000, Lenin street, 38, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [makarov@mgn.ru](mailto:makarov@mgn.ru).

**Evgenija V. Makarcheva**, Student, Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, 455000, Lenin street, 38, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [cojens@mail.ru](mailto:cojens@mail.ru).

**Аннотация:** Решается задача поиска критериев для сравнительной оценки негативного влияния пусковых процессов на техническое состояние и ресурс высоковольтных асинхронных двигателей. Предложены интегральные критерии, учитывающие наличие колебательной составляющей электромагнитного момента при различных способах и режимах пуска. Приведено сравнение различных критериев.

**Abstract:** Solves the problem of finding criteria for the comparative evaluation of the negative impact of starting processes on the technical condition and resource of high-voltage asynchronous motors. The proposed integral criteria, taking into account the presence of an oscillatory component of the electromagnetic torque at various ways and modes of start-up. The comparison of the different criteria.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, реакторный пуск, плавный пуск, пусковое устройство, тиристорный регулятор напряжения, электромагнитный момент, среднеквадратичное значение.

**Key words:** induction motor, reactor start, soft start, starting device, thyristor voltage regulator, electromagnetic torque, RMS value.

В области нерегулируемого электропривода одним из актуальных вопросов является применение устройств плавного пуска для асинхронных двигателей (АД) значительной мощности. С точки зрения минимизации негативного влияния пусковых процессов на АД наиболее эффективными являются преобразователи частоты (ПЧ) и пускатели на основе тиристорных регуляторов напряжения (ТРН). Однако стоимость таких пускателей для мощных высоковольтных АД продолжает оставаться высокой, что препятствует их массовому применению. Поэтому продолжают оставаться актуальными сравнительно недорогие способы: переключение обмоток статора с «звезды» на «треугольник» и связанные с применением реакторных и автотрансформаторных пусковых устройств. Во многих случаях их применение позволяет снизить величины экстремальных пусковых воздействий до безопасного уровня.

Выбор эффективного и, главное, экономически оправданного способа пуска, представляет собой задачу, решение которой требует учета всех особенностей работы АД в каждом конкретном случае.

В случае, если плавный пуск уже реализуется одним из известных способов, встает задача поиска оптимальных пусковых режимов, при которых некоторый критерий, определяющий негативное влияние пускового процесса принимает минимальное значение.

Так, при пуске от ТРН необходимо выбрать закон изменения подводимого к АД напряжения. При переключении обмоток необходим обоснованный выбор времени коммутации со «звезды» на «треугольник». Реализация реакторного и автотрансформаторного пуска требует выбора рациональных значений времени переключения пусковых ступеней.

В современных условиях наиболее приемлемым способом анализа пусковых режимов является исследование компьютерной модели системы «сеть электроснабжения – пусковое устройство – АД – нагрузка». Компьютерное моделирование позволяет исследовать как установившиеся, так и переходные режимы асинхронных электроприводов, работающих в различных условиях. Достоверность получаемых результатов зависит от качества и полноты модели. При исследовании компьютерной модели встает проблема сравнительной оценки различных способов пуска с точки зрения их негативного влияния на ресурс и техническое состояние двигателя.

Рассмотрим эту проблему на примере высоковольтного АД, работающего от мощной сети электроснабжения. При этом можно пренебречь влиянием на сеть и оценивать влияние пускового процесса только на двигатель.

Важнейшим негативным фактором являются динамические нагрузки, возникающие под действием колебательной составляющей электромагнитного момента. Задача снижения динамических нагрузок может быть решена путем ограничения или полного подавления колебательной составляющей электромагнитного момента. Качество решения этой задачи может быть оценено на основе численных критериев, отражающих степень наличия колебательной составляющей.

Оценочные критерии могут быть получены из анализа осциллограмм электромагнитного момента АД, которые удобно представлять в относительных единицах. На рис. 1 показана расчетная осциллограмма, иллюстрирующая пуск электропривода вентилятора, оснащенного высоковольтным АД с  $P_n = 800$  кВт,  $U_n = 6$  кВ,  $M_n = 5140$  Н·м.

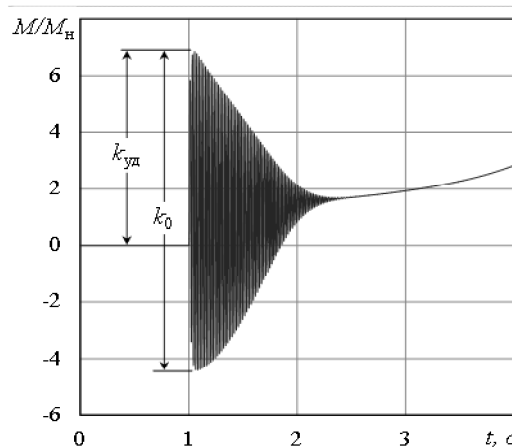


Рис. 1. Расчетная осциллограмма колебаний момента при прямом пуске:

– кратность ударного значения момента;

– кратность размаха колебаний момента

Наиболее простыми критериями являются: кратность максимальной амплитуды и кратность размаха колебательной составляющей:

$$\frac{M_{\text{уд}}}{M_n} \quad \text{и} \quad \frac{M_{\text{раз}}}{M_n} \quad (1)$$

где  $M_{\text{уд}}$  и  $M_{\text{раз}}$  – максимальное и минимальное амплитудные значения электромагнитного момента соответственно.

Эти параметры наглядны и легко могут быть определены по осциллограмме пускового процесса (рис. 1). Для маломощных двигателей, у которых время пуска мало, а длительность колебательного процесса составляет несколько периодов сетевого напряжения, параметр может являться приемлемым сравнительным критерием для анализа прямого пуска или плавного пуска с помощью ТРН.

Однако, для высоковольтных АД этот параметр недостаточно информативен, поскольку не учитывает количество бросков переходного электромагнитного

момента и длительность колебательного процесса, которые могут достигать больших значений и являются важными факторами, определяющими негативное влияние пускового процесса на техническое состояние двигателя. Кроме этого, не может применяться для описания реакторного пуска, поскольку такой пуск является двухступенчатым и имеет два последовательных колебательных процесса (рис. 2). При этом для первой ступени величина однозначно определяется параметрами реактора. Характер колебательного процесса и величина второй ступени существенно зависит от момента коммутации. Аналогично обстоит дело с автотрансформаторным пуском, который является трехступенчатым и имеет два времени переключения.

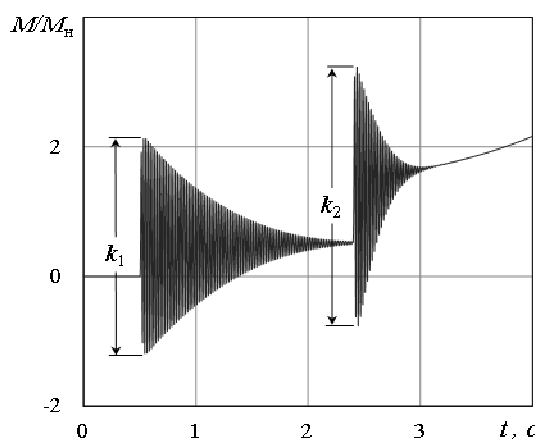


Рис. 2. Расчетная осциллограмма колебаний момента при реакторном пуске:

$k_1$  — кратность максимального размаха колебательной составляющей

Длительность колебательного процесса и характер его протекания зависят от параметров двигателя, характера нагрузки на валу, суммарного момента инерции, приведенного к валу двигателя и статического момента [1]. Для мощных АД с большим количеством значительных по величине бросков момента может достигать нескольких десятков. При этом  $k_1$  и  $k_2$  практически не оказывают влияния на значение  $k_1$ . Таким образом, параметр  $k_1$  недостаточно информативен и не может являться достоверным сравнительным критерием при анализе пусковых режимов АД.

Решение задачи сравнительного анализа требует введения точных количественных критериев. В качестве базиса для таких критериев предлагается интегральный параметр — среднеквадратичное значение (СКЗ) колебательной составляющей электромагнитного момента за время пуска АД [2]:

$$k_{\text{СКЗ}} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t M^2 dt} \quad (2)$$

где  $M$  — зависимость колебательной составляющей момента от времени.

Данный параметр выражается в размерности момента (Н·м) и рассчитывается по массиву данных, полученных при математическом или компьютерном моделировании. Выделение колебательной составляющей может осуществляться средствами цифровой обработки данных.

Параметр является интегральным и учитывает количество бросков переходного электромагнитного момента и длительность переходных процессов вне зависимости от способа пуска и выбранного режима управления пусковым устройством.

На основе  $k_{\text{СКЗ}}$  введем два относительных критерия.

1. Кратность СКЗ колебательной составляющей относительно номинального момента:

$$K_1 = \frac{k_{\text{СКЗ}}}{M_n} \quad (3)$$

где  $M_n$  — номинальный момент АД.

Этот критерий показывает, какую долю номинального момента составляет СКЗ колебательной составляющей электромагнитного момента.

2. Кратность СКЗ колебательной составляющей относительно СКЗ колебательной составляющей при прямом пуске:

$$K_2 = \frac{k_{\text{СКЗ}}}{k_{\text{СКЗ,пр}}} \quad (4)$$

где  $k_{\text{СКЗ,пр}}$  — СКЗ колебательной составляющей момента при исследуемом способе пуска;  $k_{\text{СКЗ}}$  — СКЗ колебательной составляющей при прямом пуске.

Это критерий показывает, какова доля СКЗ колебательной составляющей при выбранном способе пуска по отношению к СКЗ колебательной составляющей при прямом пуске.

Критерий  $K_1$  более универсален, т. к. включает в себя паспортную характеристику двигателя.

Критерий  $K_2$  удобен при сравнительном исследовании условий пуска в конкретных условиях эксплуатации АД. Очевидно, что

$K_2 < 1$  соответствует условиям прямого пуска,  $K_2 > 1$  — условиям лучшим, чем при прямом пуске,  $K_2 < 1$  — условиям худшим, чем при прямом пуске.

Для пояснения сказанного рассмотрим прямой пуск упомянутого высоковольтного АД в четырех значимо отличающихся режимах. Значения параметров (1), (2) и (3), рассчитанных по результатам исследований компьютерной модели, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Условия пуска			
Прямой пуск в режиме холостого хода: кг·м <sup>2</sup> ;	10,7	2340	0,455
Прямой пуск вентилятора на закрытую заслонку: кг·м <sup>2</sup>	11,3	4310	0,839
Прямой пуск с реактивным моментом на валу: кг·м <sup>2</sup> ,	11,3	4710	0,916
Прямой пуск с реактивным моментом на валу: кг·м <sup>2</sup> ,	11,3	5680	1,11

Как видно из таблицы, кратность размаха колебательной составляющей практически не зависит от условий пуска АД. В то же время параметры и значительно отличаются в каждом из случаев.

Сравним прямой (рис. 1), реакторный (рис. 2) и плавный (рис. 3) способы пуска того же двигателя с вентиляторной нагрузкой на валу и суммарным моментом инерции 250 кг·м<sup>2</sup>. Расчетные осциллограммы плавного пуска получены для двух законов изменения угла управления ТРН.

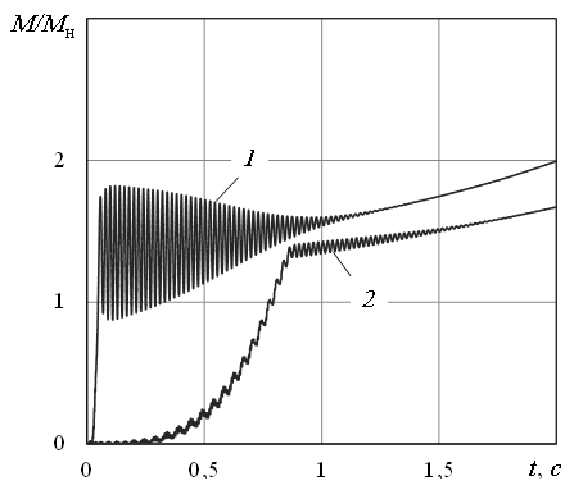


Рис. 3. Расчетная осциллограмма колебаний момента при плавном пуске:

1 – при ;  
2 – при

Значения критериев и для каждого случая приведены в табл. 2.

Параметр показывает, во сколько раз влияние колебательной составляющей момента в исследуемом режиме пуска больше, чем при прямом пуске.

Таблица 2

Способ пуска		
Прямой пуск (рис. 1)	0,839	1
Реакторный пуск (рис. 2)	0,277	0,33
Плавный пуск (рис. 3, кривая 1)	0,076	0,083
Плавный пуск (рис. 3, кривая 2)	0,0086	0,0094

Различия в численных значениях критериев достаточно наглядны и хорошо соотносятся с субъективной визуальной оценкой расчетных осциллограмм.

### Выводы

1. Выбор эффективного и экономически оправданного способа пуска мощных высоковольтных АД требует введения сравнительных критериев, позволяющих проводить достоверную количественную оценку различных реализаций способов пуска.

2. Максимальная амплитуда, кратность максимальной амплитуды, размах и кратность размаха начального электромагнитного момента не являются достаточно информативными критериями и могут быть лишь ограниченно использованы для сравнительного анализа различных способов и режимов пуска.

3. Представленные критерии и весьма чувствительны к изменениям условий пуска с точки зрения степени влияния колебательной составляющей электромагнитного момента. Эти критерии являются достоверными количественными показателями, величина которых пропорциональна негативному влиянию колебаний момента на техническое состояние и ресурс асинхронных электроприводов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов М.М., Петров Л.П., Масандилов Л.Б., Ладензон В.А. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе. М., «Энергия», 1967.
2. Вечеркин М.В., Сарваров А.С., Макаревич Е.В., Макаров А.В. Сравнительная оценка способов пуска асинхронных двигателей по колебательной составляющей электромагнитного момента / Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводе АЭП-2014: Т.1 / отв. за вып. И.В. Гуляев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С.197-202